

Temperatur inklusive Hitzewellen

Thomas Deutschländer, Hermann Mächel

- 6.1 Beobachtete Temperaturänderungen – 48**
 - 6.1.1 Klimatologische Kenntage und Quantile – 48
- 6.2 Zukunftsprojektionen – 51**
 - 6.2.1 Klimatologische Kenntage – 51
 - 6.2.2 Prozentuale Schwellenwerte und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten – 53
 - 6.2.3 Monatliche und saisonale Extreme – 53
- 6.3 Kurz gesagt – 55**
 - Literatur – 55

Neben den im Zuge der globalen Erwärmung erwarteten Änderungen der Mitteltemperaturen in Deutschland sind insbesondere die Temperaturextreme, die unser Leben prägen. Es wird davon ausgegangen, dass es nicht nur zu einer allgemeinen Verschiebung der Temperaturverteilung hin zu höheren Werten kommen wird, sondern auch zu einer Zunahme der Klimavariabilität (Fischer und Schär 2009). Ohne den zusätzlichen Anstieg der Mitteltemperaturen hätte eine erhöhte Temperaturvariabilität das vermehrte Auftreten von kalten und warmen Extremen zur Folge. Durch die Überlagerung mit einem zeitlichen Temperaturanstieg ist jedoch zukünftig zu erwarten, dass sich die Häufigkeit kalter Witterungsextreme kaum ändert, aber häufigere und intensivere warme Extreme auftreten (Hartmann et al. 2013). Hieraus ergibt sich die Frage, inwieweit es auch zu neuen, in einer bestimmten Region bislang noch nicht beobachteten Rekordwerten kommen könnte. Aus Gründen der statistischen Robustheit wird dieser Fragestellung in Auswertungen jedoch nur selten nachgegangen. Zusätzlich lassen sich gerade absolute Spitzentemperaturen mit dynamischen Klimamodellen nur bedingt realitätsgetreu simulieren. Das trifft auch auf rein statistische Klimamodelle zu.

Die Mehrzahl der wissenschaftlichen Untersuchungen beschäftigt sich vorwiegend oder gar ausschließlich mit den Veränderungen am warmen Ende der Temperaturverteilung, da dort ein höheres Schadenspotenzial zu erwarten ist. Hier spielen oft medizinische Implikationen eine wesentliche Rolle, wie der Sommer 2003 mit einer deutlich erhöhten Sterblichkeitsrate infolge der beiden Hitzewellen im Juni und insbesondere im August im westlichen und zentralen Europa deutlich gezeigt hat (z. B. Koppe et al. 2003; Robine et al. 2008). Auch die Veränderungen bei den kalten Werten sind von sozioökonomischer Bedeutung, wurden aber nur vereinzelt untersucht (Auer et al. 2005; Matulla et al. 2014).

Speziell für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland existieren bislang relativ wenige Publikationen zum sich verändernden Extremverhalten der beobachteten Temperatur. Dennoch lassen sich auf Basis der zumeist 50–100 Jahre umfassenden Beobachtungszeitreihen sowie den für Deutschland vorliegenden regionalen Klimaprojektionen bereits einige weitestgehend gesicherte Erkenntnisse ableiten. Die Aussagen für die Zukunft werden dabei von den Ergebnissen einer Reihe europäischer Forschungsprojekte gestützt, in deren Rahmen gezielt Ensembles regionaler Klimaprojektionen erstellt und kollektiv für den Kontinent ausgewertet wurden (Matulla et al. 2014; Jacob et al. 2014). Untersuchungsgrößen sind dabei häufig die sogenannten Kenn- oder Ereignistage. Teilweise werden die zu über- oder unterschreitenden Schwellenwerte aber auch mittels statistischer Quantile bestimmt. Hierbei werden bevorzugt moderate Schwellen wie z. B. das 10. oder 90. Perzentil betrachtet, was den 10% der niedrigsten bzw. höchsten Werte der vorliegenden Daten oder jeweils 36 Werten pro Jahr entspricht. Durch diese Vorgehensweise werden zwar die stärksten Extreme und somit besonders die impaktrelevanten Ereignisse nicht allein, sondern die 10% der höchsten oder niedrigsten Werte insgesamt in die Analyse einbezogen. Dafür nimmt aber die Verlässlichkeit der Ergebnisse zu.

Über die Untersuchungen auf Tagesbasis hinaus wurde auch das Verhalten von länger andauernden Ereignissen bereits ausgewertet – insbesondere Hitzewellen. Eine absolut einheitliche

Definition gibt es dabei zwar nicht, die unterschiedlichen Ergebnisse sind jedoch trotzdem gut miteinander vergleichbar. In Einzelfällen wurden auch aggregierte Werte vordefinierter Länge wie Monats- oder Jahreszeitenwerte betrachtet.

6.1 Beobachtete Temperaturänderungen

In den letzten 10–20 Jahren wurden zahlreiche Studien zu den in den vergangenen 50–130 Jahren beobachteten Änderungen extremer Temperaturereignisse – global und für Europa – publiziert. Deren wesentliche Ergebnisse wurden in einem Sonderbericht des IPCC (IPCC 2012) sowie im Fünften Sachstandsberichts des IPCC zusammengefasst (Hartmann et al. 2013). Diese Studien weisen eine generelle Tendenz zur Verschiebung der Tagesmitteltemperatur in Richtung hoher Quantilwerte und eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von extrem heißen Tagen auf. Es gilt als sicher, dass die Anzahl der warmen Tage und Nächte angestiegen und die Anzahl der kalten Tage und Nächte in Europa seit den 1950er-Jahren zurückgegangen ist. Als ebenso gesichert gilt, dass in den meisten Regionen Europas in den letzten Dekaden überproportional viele Hitzewellen (s. Box „Klimatologische Kenngrößen“ in ► Abschn. 6.2.1) aufgetreten sind (Hartmann et al. 2013).

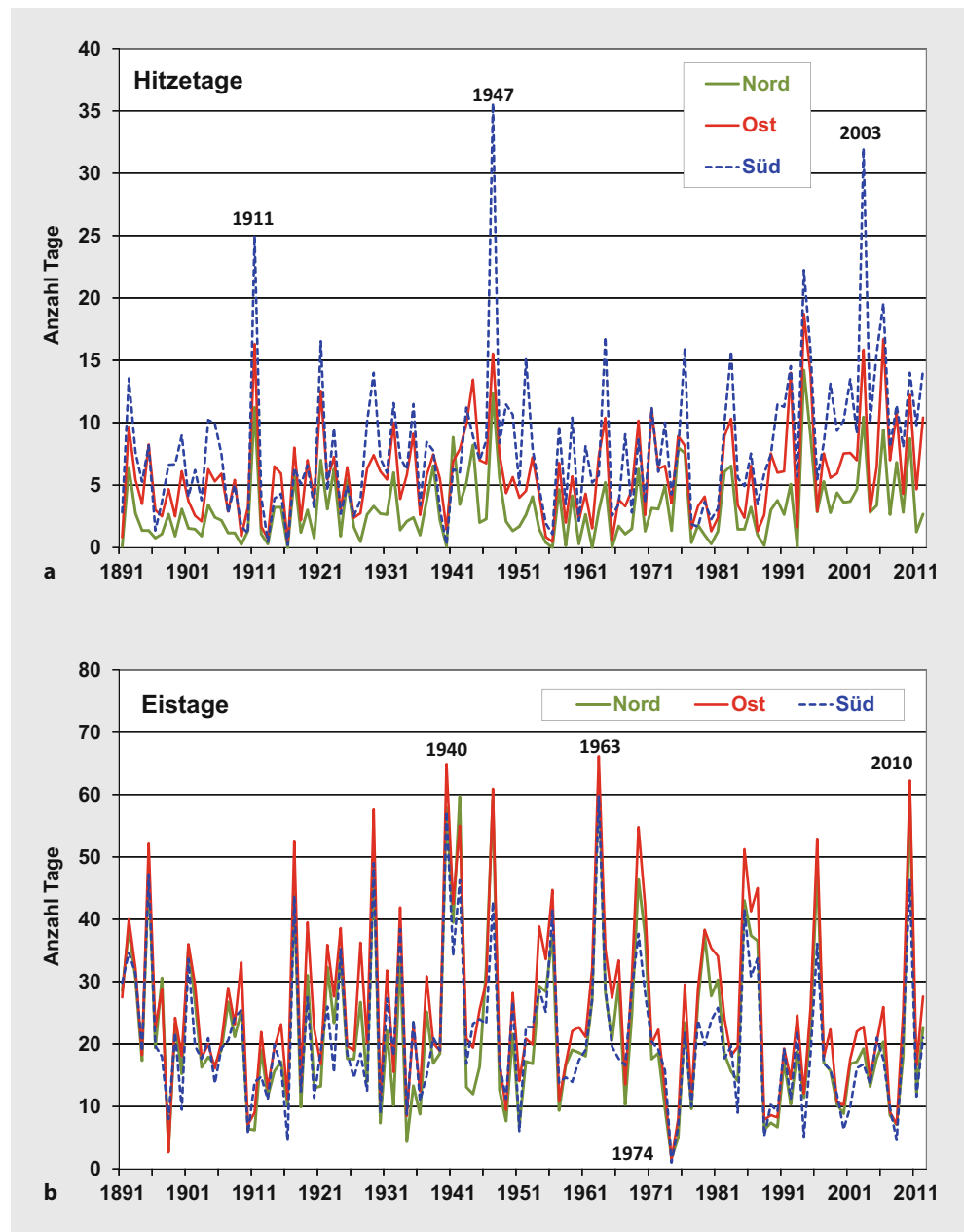
Für die statistische Auswertung stationsbezogener Messungen in Europa stehen neben den Daten der nationalen Wetterdienste auch europaweite und globale Datensammlungen zur Verfügung. Eine der am häufigsten verwendeten ist die des *European Climate Assessment & Dataset* (ECA&D) mit einer Auswahl an europäischen Stationen mit Tageswerten verschiedener meteorologischer Messgrößen (Klok und Klein-Tank 2009; ► Kap. 3).

6.1.1 Klimatologische Kennstage und Quantile

Für Deutschland existieren bislang noch wenige Publikationen zum Extremverhalten der Temperatur. Die Studie von Hundecha und Bárdossy (2005) analysiert u. a. die Trends der Temperaturindizes für kalte Nächte, TN10p, und warme Tage, TX90p, sowie der Zahl der Frosttage (s. Box „Klimatologische Kenngrößen“ in ► Abschn. 6.2.1) in allen Jahreszeiten und pro Jahr der Periode 1958–2000 für das Rheingebiet in Südwestdeutschland anhand von 232 Temperaturstationen. Für das ganze Jahr im Mittel aller Stationen zeigt TN10p einen Anstieg von 1 °C und TX90p einen Anstieg von 0,6 °C. Dabei variiert die Größenordnung der Trends mit den Jahreszeiten erheblich. Einen positiven Trend (ganzes Jahr) für TX90p und TN10p weisen 87% von 232 Stationen auf, aber nur 50% bzw. 22% der positiven TX90p- und TN10p-Trends sind statistisch signifikant. Eine Abnahme der Frosttage wurde an 87% der Stationen festgestellt, die an 47% der Stationen signifikant war.

In der räumlichen Verteilung der signifikanten Trends ist keine eindeutige Struktur erkennbar. Ein Nebeneinander von signifikanten und nichtsignifikanten Trends, auch mit unterschiedlichen Vorzeichen an benachbarten Stationen, weist auf Inkonsistenzen in den Änderungen der extremen Temperaturen hin, die offensichtlich auf inhomogene Daten zurückzuführen

■ **Abb. 6.1** Zeitreihe der jährlichen Anzahl an Hitze- (a) und Eistagen (b) für den Zeitraum 1891–2012 für Nord-, Ost- und Süddeutschland (Mittel jeweils über 15, 13 und 15 Stationen). (DWD)



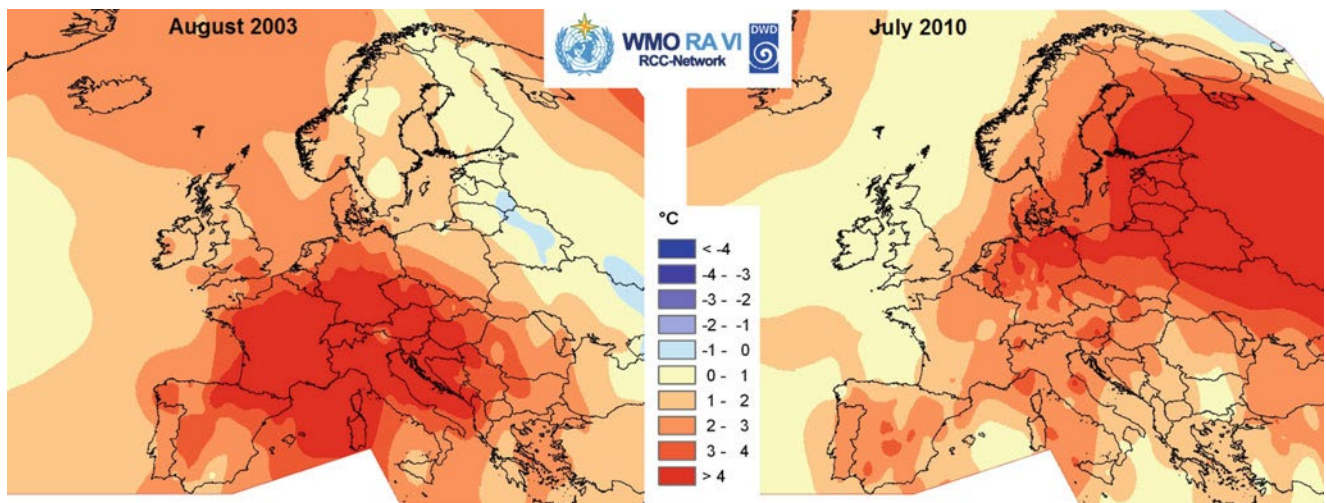
sind. Diese Vermutung wird durch die Studie von Nemeč et al. (2012) für Österreich gestützt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich die Maximumtemperatur zu mehr Extremen hin verschiebt, während die Minimumtemperatur mit positiven Trends zu weniger extremen Werten tendiert, was sich auch im Rückgang der Frosttage widerspiegelt. Dabei variieren das Vorzeichen und die Signifikanz der Trends mit der Jahreszeit. Dies zeigt sich auch in den Untersuchungen langjähriger Temperaturtrends und Änderungen in der Temperaturverteilung für einige ausgewählte deutsche Stationen, z. B. Hohenheim, Hohenpeißenberg und Hamburg (Wulfmeyer und Henning-Müller 2006; Winkler 2006; Schlünzen et al. 2010), aber auch für Österreich (Nemeč et al. 2012).

Auch Studien, die über Deutschland hinausgehen, gelangen zu ähnlichen Resultaten. So kommen z. B. Klein-Tank und Können (2003) zu dem Ergebnis, dass die Zahl der Frosttage im

Mittel über insgesamt 86 europäische Stationen zwischen 1946 und 1999 um rund 9 Tage zurückgegangen ist, während die Zahl der Sommertage (s. Box „Klimatologische Kenngrößen“ in ► Abschn. 6.2.1) gleichzeitig um rund 4 Tage gestiegen ist.

Vorläufige ausgewählte Auswertungsergebnisse der z. T. erst in den letzten Jahren digitalisierten täglichen Temperaturreihen von 43 Stationen für den Zeitraum 1891–2012 bietet ■ Abb. 6.1, in der die Zeitreihe der Anzahl von Hitze- und Eistagen pro Jahr (s. Box „Klimatologische Kenngrößen“ in ► Abschn. 6.2.1) für die drei Subregionen Nord-, Ost- und Süddeutschland als Mittel über 15, 13 und 15 Stationen dargestellt ist. Dabei ist beispielsweise erkennbar, dass die Hitzetage häufiger in Süddeutschland als in Ost- und Norddeutschland auftreten, während in Ostdeutschland die höchsten Zahlen an Eistagen notiert werden. Ferner ist ersichtlich, dass den von Jahr zu Jahr stark variierenden Zahlen der Hitze- und Eistage dekadische Schwankungen über-



■ Abb. 6.2 Temperaturabweichung vom Normalwert 1961–1990 für die Hitzewellen im August 2003 und Juli 2010. (DWD)

lagert sind. Dies gilt ebenso für die weniger extremen Sommer- und Frosttage (nicht dargestellt).

■ Hitzewellen

Einen ersten Hinweis auf das mögliche Auftreten von Hitzewellen liefern die Zeitreihen der Anzahl der Hitzetage in ■ Abb. 6.1. Daraus ist zu entnehmen, dass die Spitzenwerte der Hitzetage nicht zeitlich simultan in den drei Subregionen auftreten. In Süddeutschland ragen die Sommer 1947 und 2003 heraus. Während die Hitzewelle im Sommer 2003 intensiv untersucht wurde (z. B. Schär et al. 2004; Jonas et al. 2005), stehen derzeit kaum Informationen zu dem heißen Sommer 1947 in Deutschland zur Verfügung. Ob das Jahr 1947 den ersten Rang nach der noch ausstehenden Homogenisierung der Temperaturreihen behält, ist unsicher. Die Hitzewelle im August 2003, die weite Teile Süd- und Zentraleuropas erfasste und bis nach Süddeutschland ragte, gilt bis Redaktionsschluss als die bisher stärkste für diese Gebiete (■ Abb. 6.2).

In Ostdeutschland wurde 1992 die höchste Anzahl an heißen Tagen beobachtet. Auf die Hitzewelle Anfang August 1992 gehen Gerstengarbe und Werner (1993) näher ein. Das Zentrum lag über Ostdeutschland, mit einer Maximumtemperatur von fast 39°C südlich von Berlin. Der Sommer zeichnete sich dort in allen Monaten durch eine relative Trockenheit aus. Im Westen Deutschlands – etwa in Nordrhein-Westfalen, Hessen und Rheinland-Pfalz – war die Hitze wegen der vorkommenden Niederschläge nicht so extrem. Der Süden Deutschlands war bei normalen Niederschlägen im August um $+4^{\circ}\text{C}$ wärmer als im Mittel.

Im Allgemeinen sind die Küsten und der Westen Deutschlands wegen der Nähe zu den Meeren nicht so gefährdet wie Ostdeutschland, wo ein mehr kontinental geprägtes Klima herrscht. In Süddeutschland sorgen heiße südliche Winde dafür, dass Hitzewellen häufiger als in Ostdeutschland auftreten (■ Abb. 6.1).

Diese relativ wenigen Analysen der täglichen Lufttemperaturzeitreihen von deutschen Messstationen fügen sich in die

Ergebnisse von Studien aus anderen europäischen Ländern ein (Nemec et al. 2012).

Della-Marta et al. (2007a, 2007b) zeigen anhand von homogenisierten Zeitreihen der Tageshöchsttemperatur für 54 europäische Stationen, dass sich die Länge der sommerlichen Hitzewellen (hier anders als in der Box in ► Abschn. 6.2.1: die Höchstzahl der aufeinanderfolgenden Tage mit Temperaturmaximum über dem 95. Perzentil) im Zeitraum 1880–2005 über Westeuropa verdoppelt und die Häufigkeit sehr warmer Tage (TX95p) gar verdreifacht hat. Dabei werden in den Häufigkeitsverteilungen signifikante Änderungen sowohl in den Mittelwerten als auch in der Varianz festgestellt. Das Auftreten von Hitzewellen in Europa scheint den Autoren zufolge eng mit einem anomal hohen Luftdruck über Skandinavien und über dem westlichen Zentraleuropa verbunden zu sein. Diese Erklärung geben auch Gerstengarbe und Werner (1993) für die extreme Wärme im August 1992.

Jacobeit et al. (2009) geben als Ursache für außergewöhnlich warme Witterungsabschnitte in Mitteleuropa bestimmte Zirkulationstypen an, bei denen das Azorenhoch im Sommer deutlich östlich von seiner normalen Position liegt und somit höherer Luftdruck über dem Mittelmeer vorherrscht, der sich auch über ganz Deutschland ausdehnt und mit trockenem, wolkenlosem Wetter verbunden ist.

Da die betrachteten Hitzewellen über mehrere Wochen andauern, prägen sie auch die Monats- und Jahreszeitenmittel, die Luterbacher (2004) untersuchte. Durch Verwendung dieser, vor 1900 allerdings aus Proxydaten abgeleiteten Monats- und Saisonalwerte, konnte er den für seine Untersuchung von Hitzewellen zur Verfügung stehenden Zeitraum auf die Jahre 1500–2003 zurückverlängern. Der wärmste Sommer (JJA) dieser Zeitreihe trat 2003, der kälteste 1902 auf. Barriopedro et al. (2011) verlängern den Zeitraum bis 2010 und setzen die Hitzewelle über Russland aus dem Jahr 2010 in Beziehung zu derjenigen von 2003 über Mitteleuropa (■ Abb. 6.2). Zusätzlich leiten sie eine Rangfolge der kältesten und wärmsten Sommer für Europa aus Monatswerten ab.

6.2 Zukunftsprojektionen

In den letzten Jahren sind viele Untersuchungen zum zukünftigen Klima publiziert und im Fünften Sachstandsbericht (Hartmann et al. 2013) zusammengefasst worden. Die verschiedenen Arbeiten basieren im Wesentlichen auf den Resultaten von insgesamt drei großen und zeitlich aufeinanderfolgenden internationalen Projekten zur Generierung von Klimaprojektionsensembles, wodurch auch unterschiedliche Emissionsszenarien verwendet wurden. Darüber hinaus leidet die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unter der Vielfalt der Untersuchungsregionen und der ausgewerteten statistischen Kenngrößen, wobei in diesem Rahmen häufig die sogenannten klimatologischen Indizes verwendet werden. Hierbei handelt es sich zwar vorwiegend um Schwellenwertereignisse, diese gehören aber trotzdem oft zu verschiedenen Teilbereichen der Häufigkeitsverteilung. Das bedeutet, es werden Extremereignisse unterschiedlicher Stärke oder, anders ausgedrückt, unterschiedlicher Auftrittshäufigkeit betrachtet. Unter dem Strich dürfte aber dennoch ein hohes Maß an Vertrauen in die vorliegenden Erkenntnisse gerechtfertigt sein. Hierzu trägt nicht zuletzt die Tatsache bei, dass die vorliegenden Klimaprojektionen sowohl von verschiedenen Modelltypen – dynamisch und statistisch – als auch aus unterschiedlichen Generationen von Modellen stammen, wodurch größtmögliche Vielfalt gewährleistet ist. Dabei ist aber natürlich zu berücksichtigen, dass sowohl statistische als auch dynamische Klimamodelle bei der Modellierung neuer, bislang nicht beobachteter Extreme an ihre Grenzen stoßen.

Zur möglichst einheitlichen und übersichtlichen Darstellung der zu erwartenden Änderungen von Temperaturextremen sind im Folgenden sämtliche Ergebnisse nach Art der betrachteten Indizes gegliedert. Einer aktuellen Studie von Jacob et al. (2014) zufolge wurde Deutschland hierfür in drei Subregionen unterteilt: in die maritim geprägte Nordwesthälfte, die dem Kontinentalklima zugehörigen südöstlichen Landesteile sowie die Alpenregion. Diese Regionseinteilung unterscheidet sich von der in ► Abschn. 6.1.1 verwendeten Unterteilung hauptsächlich in der eigenständigen Betrachtung der Alpenregion. Während die als „Süddeutschland“ bezeichnete Region im ► Abschn. 6.1.1 quasi das gesamte Gebiet südlich der Mainlinie umfasst, sind große Teile Bayerns hier mit den neuen Bundesländern zu einer gemeinsamen Region zusammengefasst. Der Oberrheingraben sowie die südlich des Mains gelegenen westlichen Mittelgebirgsregionen sind dagegen der maritim geprägten Nordwesthälfte zugeordnet.

6.2.1 Klimatologische Kenntage

Bereits die Analyse der klimatologischen Kenntage zeigt deutlich, dass auch in Deutschland zukünftig mit einer wesentlich höheren Anzahl warmer Temperaturextreme zu rechnen ist. Am kalten Rand der Temperaturverteilung beschränken sich die Untersuchungen zumeist auf die Analyse der Frosttage, deren Anzahl voraussichtlich merklich zurückgehen dürfte (Matulla et al. 2014).

Für den Fall einer gemäßigten Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen (SRES A1B-Szenario) ist

davon auszugehen, dass die Zahl der Frosttage im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971–2000 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts abnehmen wird: um voraussichtlich rund 30 Tage pro Jahr im nordwestdeutschen Bereich und um bis zu 50 Tage pro Jahr in der Alpenregion. Für den Fall eines hohen Treibhausgasausstoßes (SRES A2-Szenario) ergeben sich sogar Werte zwischen 40 und 70 Tagen pro Jahr. Dabei schwanken die Werte innerhalb der Teilregionen natürlich in Abhängigkeit von der genauen Ortslage. Darüber hinaus weisen sie infolge der Berücksichtigung mehrerer Studien und der Verwendung von Ensembles, d. h. mehrerer verschiedener Klimaprojektionsläufe, einen zusätzlichen Unsicherheitsbereich auf.

In ► Abb. 6.3 ist der wahrscheinlichste Schwankungsbereich unter Voraussetzung des gemäßigten A1B SRES-Szenarios für die drei ausgewählten Klimaregionen Deutschlands dargestellt. Für die klimatologischen Kenntage basieren die dargestellten Ergebnisspannen im Allgemeinen auf den Arbeiten von Jacob et al. (2014) sowie von Spekat et al. (2007). Demnach dürfte der Rückgang der Anzahl der Frosttage gemäß diesem Szenario z. B. in der Nordwesthälfte aller Voraussicht nach zwischen 15 und 47 Tagen pro Jahr liegen. Damit verbunden ist auch ein Rückgang der Häufigkeit und/oder Dauer von Kälteperioden. Mit insgesamt nur 5–6 Tagen pro Jahr weniger, die als Teil solcher Kälteperioden auftreten, fällt dieser im Vergleich zur Abnahme der Frosttage voraussichtlich jedoch deutlich geringer aus. Zudem dürfte dieser Rückgang auch unabhängig vom betrachteten Emissionsszenario sein. Untersucht wurde hier der sogenannte *cold-spell duration index* (CSDI), eine Serie von moderat zu kalten Tagen für die jeweilige Jahreszeit (siehe Box „Klimatologische Kenngrößen“ auf der nächsten Seite). Während die Zahl der kalten Tage also allgemein deutlich zurückgeht, ist auch zukünftig mit einem relativ häufigen Auftreten zusammenhängender Kälteepisoden zu rechnen. Konkrete Zahlenwerte, auch für die aktuellen RCP-Szenarien 4.5 und 8.5, finden sich in der Studie von Jacob et al. (2014). Konsistent mit der Abnahme der Anzahl der Frosttage wird die Zahl der Sommertage voraussichtlich deutlich zunehmen. In weiten Teilen Deutschlands könnte sie sich möglicherweise sogar verdoppeln. Dies gilt dabei nicht nur für die Regionen, in denen bislang kaum Sommertage auftreten, sondern auch für die bereits sehr warmen Regionen in der Südosthälfte Deutschlands. In einigen Regionen Südwestdeutschlands wäre dann fast jeder zweite Tag in der Zeit von April–September ein meteorologischer Sommertag. Insgesamt reicht die Spanne der zu erwartenden Zunahme von etwas unter 10 Sommertagen pro Jahr in der Nordwesthälfte bis zu über 40 in der Südosthälfte. In der Alpenregion liegt sie zwischen 11 und 24 Tagen (► Abb. 6.3).

Für die aus medizinischer Sicht besonders relevanten Tropennächte unterscheiden sich die Ergebnisse in Bezug auf Emissionsszenario und betrachtete Region am deutlichsten. Nimmt deren Anzahl gemäß dem moderaten Szenario RCP4.5 in der Alpenregion und im maritim geprägten Nordwesten im Gebietsmittel nur um 1–3 bzw. 1–5 Tage pro Jahr zu, so liegt der wahrscheinlichste Wert in den kontinentalen Landesbereichen gemäß den beiden Szenarien A1B und RCP8.5 bei über 20 Tagen pro Jahr. Für diese Region ergibt sich jedoch auch für das RCP4.5-Szenario bereits eine Änderung von etwa 9 Tagen pro Jahr (Jacob

Klimatologische Kenngrößen bezogen auf die Temperatur

- Frosttag: Die Tiefsttemperatur des Tages (24 h) liegt unter 0 °C.
- Eistag: Die Tageshöchsttemperatur bleibt unterhalb von 0 °C.
- Sommertag: Die Tageshöchsttemperatur erreicht mindestens 25 °C.
- Hitzetag: Die Tageshöchsttemperatur erreicht mindestens 30 °C (im klimatologischen Sprachgebrauch häufig auch als sogenannter „Heißer Tag“ bezeichnet).
- Tropennacht: Die Tiefsttemperatur des Tages (24 h) fällt nicht unter 20 °C.
- Kalte Nächte (TN10p): Zahl der Tage, an denen die tägliche Minimumtemperatur unter das 10%-Quantil der täglichen Minimumtemperaturen einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode fällt.
- Warme Nächte (TN90p): Zahl der Tage, an denen die tägliche Minimumtemperatur über dem 90%-Quantil der täglichen Minimumtemperaturen einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode liegt.
- Kalte Tage (TX10p): Zahl der Tage, an denen die tägliche Maximumtemperatur unter das 10%-Quantil der täglichen Maximumtemperaturen einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode fällt.
- Warme Tage (TX90p): Zahl der Tage, an denen die tägliche Maximumtemperatur über dem 90%-Quantil der täglichen Maximumtemperaturen einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode liegt.
- Sehr warme Tage (TX95p): Zahl der Tage, an denen die tägliche Maximumtemperatur über dem 95%-Quantil der täglichen Maximumtemperaturen einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode liegt.
- *Cold spell duration index (CSDI)*: Anzahl aufeinanderfolgender Tage (mindestens 6), an denen die Tiefsttemperatur des Tages in den Bereich der 10% kältesten Werte aller für den jeweiligen Tag des Jahres vorliegenden Werte einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode fällt.
- *Warm spell duration index (WSDI)*: Anzahl aufeinanderfolgender Tage (mindestens 6), an denen die Tageshöchsttemperatur in den Bereich der 10% wärmsten Werte aller für den jeweiligen Tag des Jahres vorliegenden Werte einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode fällt.
- Hitzewelle (wie hier verwendet): eine Episode von mehr als 3 aufeinanderfolgenden Tagen im Zeitraum Mai–September, an denen die Tageshöchsttemperatur in den Bereich der 1% wärmsten Werte aller für den Zeitraum Mai–September vorliegenden Werte einer beliebigen, aber fixen Bezugsperiode fällt.

et al. 2014). Die Auswertungen von Spekat et al. (2007) weisen zumindest für die gesamte Südosthälfte (inklusive der Alpenregion) eine deutlich geringere Zunahme der Anzahl der Tropennächte aus. Hiernach muss mit einer Zunahme dieser Ereignisse von maximal 5 Tagen pro Jahr gerechnet werden. Entsprechend groß ist der in ■ Abb. 6.3 dargestellte Unsicherheitsbereich für diese Kenngröße.

■ Wärmeperioden

Zur Bewertung der Veränderungen länger andauernder warmer Temperaturextreme existieren ebenfalls mehrere verschiedene Indizes. Besonders geläufig ist dabei der *warm spell duration index (WSDI)*, bei dem es sich analog zum CSDI um eine Abfolge von moderat zu warmer Tage für die jeweilige Jahreszeit handelt. Die Anzahl der in Form solcher Wärmeperioden auftretenden Tage nimmt auch bei diesem Index, wiederum bezogen auf das gesamte Kalenderjahr und nicht nur auf die warme Jahreszeit, schon dem gemäßigten RCP4.5-Szenario zufolge zukünftig deutlich zu. Die stärkste Zunahme mit etwa 34 Tagen wird dabei für die Alpenregion projiziert. Aber auch in den anderen Gebieten liegt der wahrscheinlichste Wert bei über 20 Tagen pro Jahr. Die für das RCP8.5-Szenario berechneten Änderungssignale sind nochmals etwa um den Faktor 3 höher. In der Alpenregion könnten somit zum Ende des 21. Jahrhunderts nahezu 100 Tage mehr als heute einer solchen Periode angehören. Legt man die auf dem 90. Perzentil basierende Definition dieses Index zugrunde, so entspräche das annähernd einer Vervielfachung der aktuellen Häufigkeit. Im Gegensatz zu den Änderungen der Tropennächte liegen die Ergebnisse für das SRES A1B-Szenario bei diesem Index etwa in der Mitte zwischen den beiden betrachteten RCP-Szenarien (Jacob et al. 2014).

Vermutlich von größerem Interesse als die Häufigkeit von überdurchschnittlich warmen Perioden im gesamten Jahresverlauf ist die zu erwartende Änderung speziell in den Sommermonaten. Zu deren Abschätzung haben Fischer und Schär (2010) die Auswertungen mithilfe des WSDI auf den meteorologischen

Sommer, d. h. die Monate Juni, Juli und August, beschränkt. Wie ■ Abb. 6.3 zeigt, steigt die Häufigkeit dieser so definierten gemäßigten Hitzewellen bei Betrachtung des SRES A1B-Szenarios bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in Deutschland weitverbreitet um das 6- bis 18-Fache an. In der Alpenregion könnte die Zunahme sogar noch größer ausfallen. Zudem ist davon auszugehen, dass auch die Intensität von Hitzewellen in Mitteleuropa zukünftig deutlich zunehmen wird. Im Hinblick auf deren Andauer ist dagegen mit weniger ausgeprägten Änderungen zu rechnen (Beniston et al. 2007; Fischer und Schär 2010; Hundecca und Bárdossy 2005, Koffi und Koffi 2008).

Jacob et al. (2014) verwenden gleich zwei weitere Definitionen zur Erfassung von Hitzewellen während der warmen Jahreszeit. Beide basieren auf den täglichen Höchsttemperaturen ausschließlich im Zeitraum Mai–September, unterscheiden sich aber sowohl in Bezug auf die Mindestandauer als auch hinsichtlich der exakten Schwellenwertbestimmung. Zum einen verwenden die Autoren die z. B. auch schon von Frich et al. (2002) verwendete strenge Definition von Hitzewellen als ein Ereignis von mehr als 5 aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Höchsttemperatur von mindestens 5 °C oberhalb der mittleren Höchsttemperatur im Zeitraum Mai–September. Diese ist jedoch für Deutschland kaum von Bedeutung. Lediglich für den Süden ergibt sich überhaupt ein von Null verschiedenes Änderungssignal. Im Zeitraum 2071–2100 könnten dort gemäß dem RCP8.5-Szenario im Mittel etwa 1–3 solcher Ereignisse pro Jahr mehr auftreten als es im Bezugszeitraum 1971–2000 der Fall war. Hierzulande relevanter ist dagegen die zweite von Jacob et al. (2014) untersuchte Definition einer Hitzewelle, bei der der Schwellenwert unter Verwendung des 99. Perzentils der Verteilungsfunktion bestimmt und die Andauer des Ereignisses auf mehr als 3 Tage reduziert wird. Hiermit ergeben sich zumindest für das Ende des Jahrhunderts für weite Teile Deutschlands nennenswerte Änderungssignale. Die Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien sind dabei allerdings deutlich. Zusätzlich ist ein markanter Nord-Süd-Gradient vorhanden. Dem moderaten Szenario zufolge dürfte

sich die Anzahl der Hitzewellen in Norddeutschland auch bis zum Zeitraum 2071–2100 kaum verändern, während sie im Süden vermutlich um 5–10 Ereignisse pro Jahr zunimmt. Für das RCP8.5-Szenario ergeben sich Werte zwischen 5 im Norden und 30 Fällen pro Jahr im Süden.

6.2.2 Prozentuale Schwellenwerte und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten

Eine jahreszeitlich differenzierte Auswertung sowohl separat für sieben Teilregionen als auch für Deutschland insgesamt haben Deutschländer und Dalelane (2012) vorgelegt. Neben der häufig verwendeten klassischen Extremwertstatistik erfolgte die Auswertung der Klimaprojektionen dabei insbesondere auch durch Anwendung der Methode der Kerndichteschätzung. Letzteres Verfahren entspricht der Berechnung eines gewichteten gleitenden Mittels und ermöglicht die statistisch robuste und von der Wahl der Schwelle unabhängige Abschätzung der Überschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmter Temperaturwerte als kontinuierliche Funktion der Zeit (Dalelane und Deutschländer 2013).

Wie die Untersuchung zeigt, nimmt die Überschreitungswahrscheinlichkeit sowohl moderater als auch relativ hoher Schwellen der Tageshöchsttemperaturen im Verlauf des 21. Jahrhunderts in beinahe allen Jahreszeiten praktisch ohne Pause zu. Untersucht wurden dafür das 90., 95. und 99. Perzentil. Insbesondere in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts steigt die Auftrittshäufigkeit solcher Ereignisse gemäß SRES A1B-Szenario rasant an und erreicht bis zum Jahr 2100 im Jahresmittel mindestens das 3- bis 5-Fache der heutigen Verhältnisse. Nur für das Frühjahr ergeben sich etwas geringere Änderungssignale. Zudem kommt es ausschließlich zu dieser Jahreszeit im späten Verlauf des Jahrhunderts wieder zu einem leichten Rückgang der Häufigkeit extremer Temperaturereignisse. Die größten Änderungen ergeben sich jedoch für die Hauptjahreszeiten. Trotz der vergleichsweise großen Schwankungsbreite der einzelnen Modellergebnisse übertreffen die zu erwartenden Änderungen während der Sommermonate die für das vollständige Kalenderjahr ermittelten Werte nochmals deutlich. In den Monaten Juni, Juli und August könnten die zukünftigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten auf mindestens das 4-Fache im Fall der beiden unteren Schranken und auf das 5- bis sogar 17-Fache der aktuellen Häufigkeiten im Falle des 99. Perzentils ansteigen (■ Abb. 6.3). Das bedeutet, dass ein heute in einer bestimmten Region nur etwa einmal pro Sommer erreichter Tageshöchstwert zum Ende des 21. Jahrhunderts zwischen 5- und möglicherweise sogar bis zu 16-mal auftreten würde. Prinzipiell stützen andere Veröffentlichungen diese Erkenntnisse speziell für den Sommer (z. B. Fischer und Schär 2009 oder Kjellström et al. 2007). Zwar übertreffen die für den Winter berechneten Änderungssignale die Werte für den Sommer sogar noch, jedoch dürften die sozioökonomischen Auswirkungen zu dieser Jahreszeit zumeist von eher geringerer Bedeutung sein.

Noch drastischer fallen die Ergebnisse der mittels klassischer Extremwertstatistik bestimmten Wiederkehrintervalle für Temperaturschwellen mit heute 10-, 25- und 50-jährigen Intervallen aus. Die Auswertungen für diese im Vergleich zu den mittels

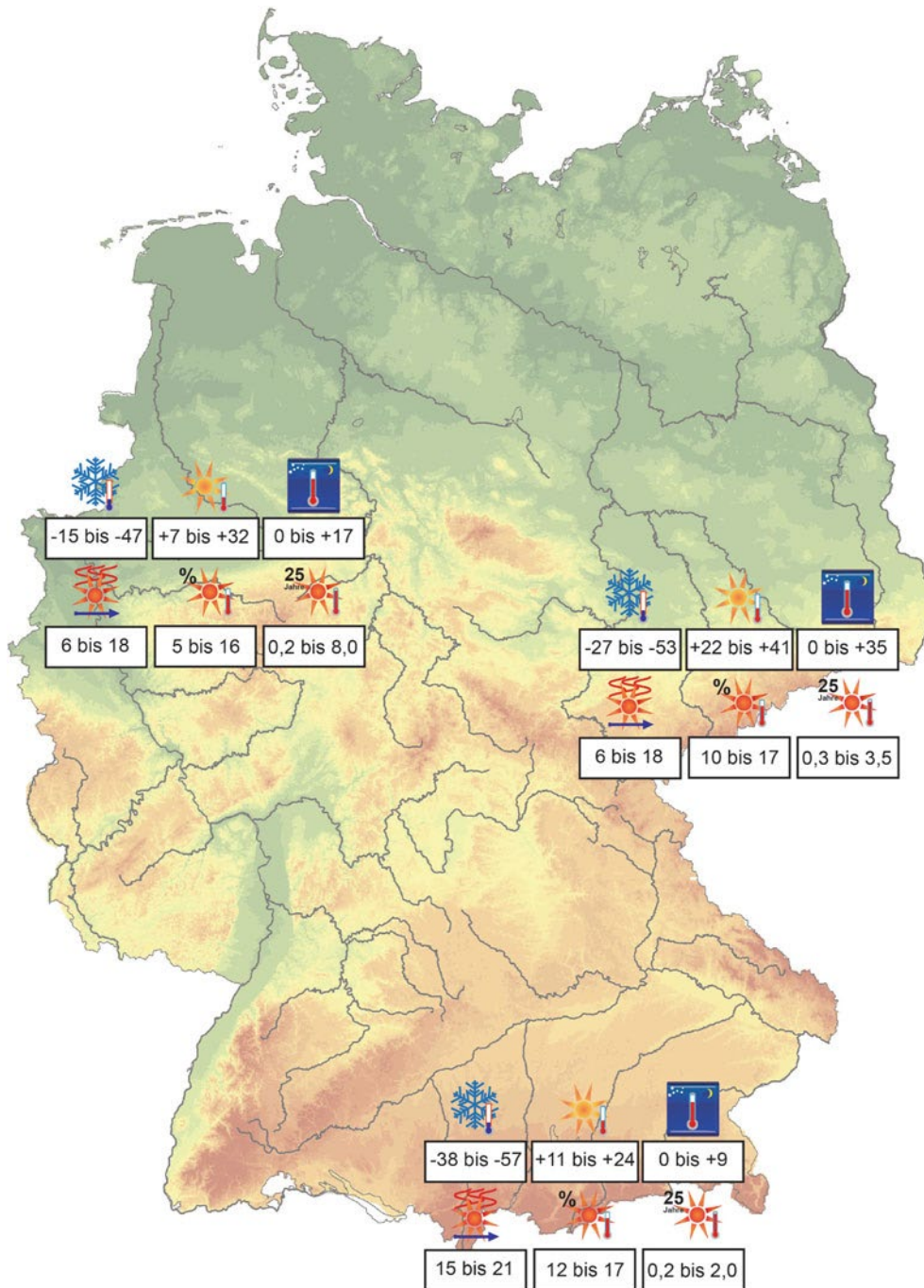
Kerndichteschätzung analysierten Schwellen deutlich selteneren Ereignisse zeigen zumeist nochmals wesentlich größere Änderungssignale. Für Ereignisse, die derzeit noch etwa einmal pro Jahr auftreten (99. Perzentil bei meteorologisch definierten Jahreszeiten), wurden maximale Zunahmen um das 20- bis 25-Fache berechnet. Um das Jahr 2090 herum dürften Ereignisse, die aktuell alle 50 Jahre auftreten, nahezu jährlich zu beobachten sein. Lediglich für den Frühling zeigen sich auch mit dieser Auswertemethode und für diese Schwellenwerte etwas geringere Änderungen.

Zwischen März und Mai liegen die Wiederkehrintervalle in Abhängigkeit von der Region in Deutschland sowie der betrachteten Klimaprojektion meist bei 3–5 Jahren. Gesondert erwähnt seien auch für diese bereits am oberen Rand der statistischen Belastbarkeit liegenden Temperaturschwellen die für den Sommer zu erwartenden Änderungen. Für die 25-jährigen Ereignisse ergeben sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts praktisch für alle betrachteten Simulationen deutschlandweit Wiederkehrintervalle von unter 10 Jahren, zumeist aber eine Spanne von 0,2–5 Jahren (■ Abb. 6.3). Der ungünstigste Fall wäre also, dass heute noch äußerst selten überhaupt zu beobachtende Höchsttemperaturwerte zukünftig bis zu 5-mal pro Jahr auftreten würden.

Auch Knotte et al. (2010) untersuchen die zu erwartenden Änderungen 10- und 30-jähriger Wiederkehrintervalle der Temperatur im Sommer für den Zeitraum 2015–2024, also für eine sehr nahe Zukunft. Hierfür verwenden sie eine mit 1,3 km sehr hoch aufgelöste Projektion des regionalen Klimamodells COSMO-CLM, um sowohl konvektive Prozesse als auch topografische Effekte adäquat simulieren zu können. Das Modellgebiet beschränkt sich dabei der hohen Auflösung entsprechend auf Rheinland-Pfalz sowie die angrenzenden Regionen. Dieser Studie zufolge ist schon während dieses baldigen Zeitraums – 2015 bis 2024 – mit einem Anstieg beider Wiederkehrwerte der täglichen Tiefsttemperaturen um gut 2 °C gegenüber dem Bezugszeitraum 1960–1969 zu rechnen. Für die Tagesmitteltemperaturen ergibt sich ein Anstieg um etwa 3,4 °C und für die täglichen Höchsttemperaturen sogar um mehr als 4 °C. Vor dem Hintergrund der allgemeinen Erwartung stärker steigender Minimumtemperaturen ist dieses Resultat sicher ebenso überraschend wie die überdurchschnittlich hohe Größenordnung der Änderungen selbst.

6.2.3 Monatliche und saisonale Extreme

Eine etwas andere Herangehensweise an die Fragestellung, wie sich Temperaturextreme zukünftig verändern könnten, haben Estrella und Menzel (2013) gewählt. Sie untersuchen die gemeinsame Verteilung monatlicher und saisonaler Temperatur- und Niederschlagsanomalien im Hinblick auf das Auftreten extremer Ereignisse für das Gebiet von Bayern auf Basis einer Simulation für SRES B2 mit dem statistischen Regionalmodell WettReg. Hierfür definierten sie insgesamt vier extreme Klassen: kühl/trocken, kühl/feucht, warm/trocken sowie warm/feucht. Demnach werden die kühlen Extreme zukünftig allgemein rasch abnehmen. Besonders markant fällt das Ergebnis der Untersuchung für den Monat Juni aus, der im Zeitraum 2041–2050 fast in der Hälfte



■ **Abb. 6.3** Für den Zeitraum 2071–2100 gemäß Emissionsszenario SRES A1B zu erwartende Änderungen ausgewählter Klimakenngrößen im Vergleich zum Klima des 20. Jahrhunderts (C20-Simulation) für drei großräumige Klimaregionen Deutschlands. Von oben links nach unten rechts: Zahl der Frosttage; Zahl der Sommertage; Zahl der Tropennächte; Änderung der mittleren Anzahl der Tage pro Sommer (Juni–August), die einer Wärmeperiode gemäß der Definition des WSDI angehören, als Verhältnis Szenario/C20; Änderung der Überschreitungshäufigkeiten des 99. Perzentils der Tageshöchsttemperaturen (für die Sommermonate und bezogen auf das Klima des 20. Jahrhunderts) als Verhältnis Szenario/C20; Wiederkehrintervalle (in Jahren) von Ereignissen im Szenariozeitraum, die im Klima des 20. Jahrhunderts ein Intervall von 25 Jahren aufweisen (ebenfalls für die Sommermonate). Alle angegebenen Zahlenwerte basieren auf den Ergebnissen der Studien von Deutschländer und Dalelane (2012), Fischer und Schär (2010), Jacob et al. (2014) und Spekat et al. (2007). Die Bandbreite der dargestellten Resultate ergibt sich infolge der Vielzahl der untersuchten Klimamodellläufe sowie durch die räumlichen Unterschiede innerhalb der drei betrachteten Klimaregionen

aller Fälle (43 %) extrem warm und trocken werden könnte. Außerdem ist davon auszugehen, dass bis zu diesem Zeitraum etwa jeder zweite Winter und jeder dritte Februar in die Klasse warm/feucht fällt. Mit einer sehr ähnlichen Vorgehensweise hatte Beniston (2009) schon gezeigt, dass kalte Wettersituationen in Europa

bis zum Jahr 2100 vermutlich praktisch vollständig zugunsten warmer Verhältnisse verschwinden werden. Im Rahmen dieser Studie wurde allerdings das im Verhältnis zum SRES B2-Szenario sehr pessimistische SRES A2 betrachtet.

■ Änderung der Verteilungsform

Ein sehr wichtiger Aspekt in Bezug auf Temperaturextreme ist die Frage, ob es im Zuge des Klimawandels zu einer grundsätzlich erhöhten Klimavariabilität und damit tatsächlich auch zu einer überdurchschnittlich hohen Zunahme der Häufigkeit besonders starker Hitzeereignisse kommen wird. Ebenso ist natürlich von Interesse, ob zukünftig auch bislang nicht erreichte Temperaturen auftreten könnten.

Eine eindeutige Antwort, zumindest auf die erste Frage, liefern Deutschländer und Dalelane (2012). Das in dieser Studie beschriebene Verhältnis der Zunahme der Überschreitungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe der Schwelle untermauert die grundsätzliche Erwartung: Je seltener das Ereignis grundsätzlich ist, desto größer ist dessen prozentuale Zunahme. Besonders heftige Extreme dürften demnach zukünftig – im Vergleich zu heute – unverhältnismäßig oft auftreten. Dies gilt für alle betrachteten Jahreszeiten sowie für alle Regionen. Dieses Resultat wird durch die Arbeit von Jacob et al. (2008) gestützt. Für alle drei von den Autoren betrachteten Emissionsszenarien (SRES A1B, B1 und A2) zeigen die Auswertungen eine prozentual höhere Zunahme der Zahl der „heißen Tage“ als im Fall der Sommertage und untermauern somit dieses wichtige Ergebnis. Knote et al. (2010) stellen dagegen keine Zunahme des Änderungssignals mit steigendem Wiederkehrintervall fest.

Jacob et al. (2008) untersuchen zudem auch das Verhalten der absoluten Temperaturmaxima. Für den Zeitraum 2071–2100 zeigen die betrachteten Simulationen mit dem Regionalmodell REMO einen Anstieg der Werte von 3,2 °C (B1-SRES-Szenario) bis zu 6,5 °C (A2-SRES-Szenario) gegenüber dem Bezugszeitraum 1961–1990. Demnach würden zukünftig deutlich höhere Temperaturspitzenwerte erreicht werden als bisher. Demgegenüber konstatieren Spekat et al. (2007) auf Basis des statistischen Regionalmodells WettReg ebenfalls mit den SRES-Szenarien A1B, B1 und A2, dass der Ausgleich der deutlich zurückgehenden Anzahl der Tage mit niedrigen Höchsttemperaturen „hauptsächlich im Bereich der mittleren Werte und der ‚mittleren Extreme‘, und nicht so sehr bei den höchsten Werten“ stattfindet. Auch die Anzahl neuer Extremwerte würde diesen Simulationen zufolge nicht übermäßig stark zunehmen.

6.3 Kurz gesagt

Teilweise bis in das 19. Jahrhundert zurückreichende Beobachtungsdaten zeigen eine allgemeine Zunahme warmer Temperaturextreme bei gleichzeitiger Abnahme kalter Extreme. Besonders deutlich ist diese Entwicklung im Fall der jahreszeitlichen Mitteltemperaturen von meteorologischem Sommer und Winter und gerade auf der kalten Seite zu erkennen.

Aber nicht nur die jahreszeitlichen Mittelwerte haben sich verändert, auch die Verteilung der Tagesmitteltemperaturen zeigt eine Verschiebung in Richtung höherer Temperaturwerte. Damit geht auch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extremer Hitzetage einher. Als praktisch erwiesen gilt zudem die Tatsache, dass die Anzahl warmer Tage und Nächte angestiegen und die Anzahl kalter Tage und Nächte seit den 1950er-Jahren zurückgegangen ist. Gerade aus medizinischer Sicht ist zusätzlich

von Bedeutung, dass sich die Andauer sommerlicher Hitzewellen über Westeuropa seit 1880 etwa verdreifacht hat.

Für die Zukunft lassen Klimaprojektionen insbesondere bei unverminderter Treibhausgasemission eine deutliche Verschärfung der bereits beobachteten Entwicklung erwarten. So könnte z. B. die Anzahl von Hitzewellen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im ungünstigsten Falle um bis zu 5 Ereignisse pro Jahr in Norddeutschland und um bis zu 30 Ereignisse pro Jahr in Süddeutschland zunehmen. Auch die Auftrittswahrscheinlichkeit derzeit nur etwa einmal pro Jahr zu beobachtender Tageshöchsttemperaturen dürfte drastisch ansteigen. Speziell während der Sommermonate scheint hier selbst eine Verzehnfachung solcher Ereignisse durchaus realistisch zu sein.

Literatur

- Auer I, Matulla C, Böhm R, Ungersböck M, Maugeri M, Nanni T, Pastorelli R (2005) Sensitivity of frost occurrence to temperature variability in the European Alps. *International Journal of Climatology* 25:1749–1766
- Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, Trigo RM, Garcia-Herrera R (2011) The hot summer of 2010. Redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332:220–224
- Beniston M (2009) Decadal-scale changes in the tails of probability distribution functions of climate variables in Switzerland. *Int J Climatol* 29:1362–1368
- Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, Ferro CAT, Frei C, Goyette S, Halsnaes K, Holt T, Jylhä K, Koffi B, Palutikof J, Schöll R, Semmler T, Woth K (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81:71–95. doi:10.1007/s10584-006-9226-z
- Dalelane C, Deutschländer T (2013) A robust estimator for the intensity of the Poisson point process of extreme weather events. *Weather and Climate Extremes* 1:69–76. doi:10.1016/j.wace.2013.07.003
- Della-Marta PM, Haylock MR, Luterbacher J, Wanner H (2007a) Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *J Geophys Res* 112. doi:10.1029/2007jd008510
- Della-Marta PM, Luterbacher J, von Weissenfluh H, Xoplaki E, Brunet M, Wanner H (2007b) Summer heat waves over western Europe 1880 bis 2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. *Climate Dynamics* 29:251–275. doi:10.1007/s00382-007-0233-1
- Deutschländer T, Dalelane C (2012) Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesanstalt Technisches Hilfswerk. Deutscher Wetterdienst, Umweltbundesamt, Offenbach am Main (Abschlussbericht)
- Estrella N, Menzel A (2013) Recent and future climate extremes arising from changes to the bivariate distribution of temperature and precipitation in Bavaria, Germany. *International Journal of Climatology* 33:1687–1695. doi:10.1002/joc.3542
- Fischer EM, Schär C (2009) Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes. *Climate Dynamics* 33:917–935. doi:10.1007/s00382-008-0473-8
- Fischer EM, Schär C (2010) Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience* 3:398–403. doi:10.1038/NNGEO866
- Frich P, Alexander LV, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein Tank AMG, Peterson T (2002) Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19:193–212
- Gerstengarbe F-W, Werner PC (1993) Extreme klimatologische Ereignisse an der Station Potsdam und an ausgewählten Stationen Europas. *Berichte des Eigenverlag Offenbach*, 615 p. 1.
- Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M, Alexander LV, Brönnimann S, Charabi Y, Dentene FJ, Dlugokencky EJ, Easterling DR, Kaplan A, Soden BJ,

- Thorne W, Wild M, Zhai PM (2013) Observations: Atmosphere and Surface. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Hrsg) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Hundecca Y, Bárdossy A (2005) Trends in daily precipitation and temperature extremes across Western Germany in the second half of the 20th century. *Int J Climatol* 25:1189–1202
- IPCC (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In: Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (Hrsg) *A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, S 582
- Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Umweltbundesamt, Climate Change, 11/08, Forschungsbericht, 204 41 138, UBA-FB 000969, ISSN 1862-4359
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Bøssing Christensen O, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana J-F, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B, Yiou P (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14:563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2
- Jacobbeit J, Rathmann J, Philipp A, Jones PD (2009) Central European temperature and precipitation extremes in relation to large-scale atmospheric circulation types. *Meteorol Z* 18:397–410
- Jonas M, Staeger T, Schönwiese C-D (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. Umweltbundesamt, Forschungsbericht, 201 41 254, UBA-FB 000845
- Kjellström E, Bärring L, Jacob D, Jones R, Lenderink G, Schär C (2007) Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe. *Climatic Change* 81:249–265. doi:10.1007/s10584-006-9220-5
- Klein-Tank AMG, Können GP (2003) Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *J Climate* 16:3665–3680
- Klok EJ, Klein Tank AMG (2009) Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int J Climatol* 29:1182–1191. doi:10.1002/joc.1779
- Knote C, Heinemann G, Rockel B (2010) Changes in weather extremes: Assessment of return values using high resolution climate simulations at convection-resolving scale. *Meteorologische Zeitschrift* 19:11–23. doi:10.1127/0941-2948/2010/0424
- Koffi B, Koffi E (2008) Heat waves across Europe by the end of the 21st century: multiregional climate simulations. *Climate Research* 36:153–168. doi:10.3354/cr00734
- Koppe C, Jendritzky G, Pfaff G (2003): Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. Klimastatusbericht 2003, 152–162. Deutscher Wetterdienst, Offenbach a Main, ISSN 1437-7691
- Luterbacher J, Dietrich D, Xoplaki E, Grosjean M, Wanner H (2004) European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends and Extremes Since 1500. *Science* 303:1499–1503
- Matulla C, Namyslo J, Andre K, Chimani B, Fuchs T (2014) Design guideline for a climate projection data base and specific climate indices for roads: CliPDaR. TRA2014. 10p. http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fpaper_17592.pdf
- Nemec J, Gruber C, Chimani B, Auer I (2012) Trends in extreme temperature indices in Austria based on a new homogenised dataset. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.3532
- Robine J-M et al (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biologies* 331:171–178
- Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427:332–336. doi:10.1038/nature02300
- Schlünzen KH, Hoffmann P, Rosenhagen G, Riecke W (2010) Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology* 30:1121–1136
- Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63/L31 2010–2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen, 204 41 138
- Winkler P (2006) Hohenpeißenberg 1781–2006: das älteste Bergobservatorium der Welt. *Geschichte der Meteorologie in Deutschland* 7:174
- Wulfmeyer V, Henning-Müller I (2006) The climate station of the University of Hohenheim: Analyses of air temperature and precipitation time series since 1878. *International Journal of Climatology* 26(113):138. doi:10.1002/joc.1240

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwasige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.